



(21) Aktenzeichen: 195 31 771.8  
 (22) Anmeldetag: 29. 8. 95  
 (43) Offenlegungstag: 6. 3. 97

## (71) Anmelder:

Siemens AG, 80333 München, DE

## (72) Erfinder:

Depenbrock, Manfred, Prof. Dr.-Ing., 44797 Bochum,  
DE

## (56) Entgegenhaltungen:

DE 32 34 603 C3  
EP 4 36 138 A1

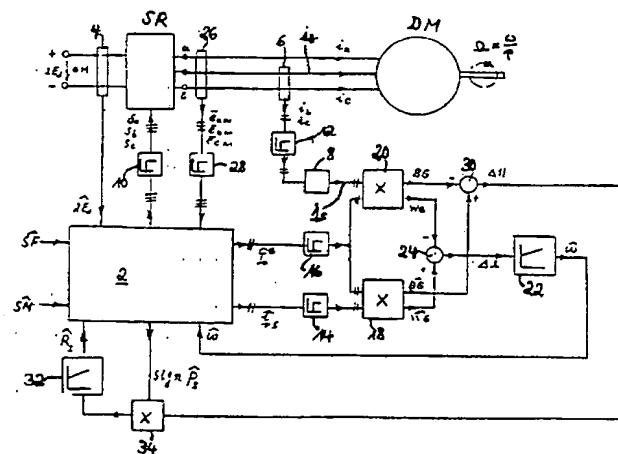
Tajima, Hori: »Speed Sensorless  
Field-Orientation...« in: IEEE Transact. on Ind.  
Appl. 1993, H. 1, S. 175-180;  
Peng: »Robust Speed Identification...« in:  
IEEE-Transact. on Ind. Appl. 1994, H. 5, S. 1234-1240;  
Schauder: »Adaptive speed Identification...« in: IEEE  
Trans. on Ind. Appl., 1992, H. 5, S. 1054-1061;

Boussak, Capolino, Phnoc: »Speed measurement in  
Vector-Controlled...« in EPE-Konferenzband 3,  
Firenze 1991, S. 653-658;  
Kubota, Matsuse, Nakano: »DSP-Based Speed...« in  
IEEE Trans. on Ind. Appl. 1993, H. 2, S. 344-348;  
Kubota, Matsuse: »Speed Sensorless...« in IEEE  
Trans. on Ind. Appl. 1994, H. 5, S. 1219-1224;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

## (54) Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung einer Drehzahl einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine

(57) Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung einer Drehzahl einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine, wobei mittels einer Signalverarbeitung, die unter anderem ein vollständiges Maschinenmodell und einen Modulator enthält, in Abhängigkeit eines Fluß-Sollwertes, eines Drehmoment-Sollwertes, eines Gleichspannungswertes, gemessener Stromrichter-Ausgangsspannungswerte und Systemparameter Steuersignale, ein Statorstrom-Modellraumzeiger und ein konjugiert komplexer Bezugsräumzeiger berechnet werden. Erfungsgemäß werden ein ermittelter Statorstrom-Raumzeiger und der berechnete Statorstrom-Modellraumzeiger mit dem konjugiert komplexen Bezugsräumzeiger multipliziert, werden jeweils die Imaginäranteile der berechneten Produkte miteinander verglichen und wird die daraus ermittelte Regelabweichung derart zur Verstellung des Systemparameters Rotorwinkelgeschwindigkeit verwendet, daß die ermittelte Regelabweichung zu Null wird. Somit erhält man ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens, mit dem eine Drehzahl einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine ohne großen Aufwand bis zu kleinsten Drehzahlen ermittelt werden kann.



## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung einer Drehzahl einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine, wobei mittels einer Signalverarbeitung, die unter anderem ein vollständiges Maschinenmodell und einen Modulator enthält, in Abhängigkeit eines Fluß-Sollwertes, eines Drehmoment-Sollwertes, eines Gleichspannungswertes, gemessener Stromrichter-Ausgangsspannungswerte und Systemparameter einerseits Steuersignale und andererseits ein Statorstrom-Modellraumzeiger und ein konjugiert komplexer Bezugraumzeiger berechnet werden und eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Über Stromrichter gespeiste Drehfeldmaschinen mit am Stator- oder Rotormagnetfeld orientierter Regelung gestatten es, das Drehmoment mit guter Genauigkeit auf gewünschte Werte einzustellen und auch hochdynamisch zu verändern. Solange die höchste Ausgangsspannung des Stromrichters noch nicht benötigt wird, kann, praktisch unabhängig vom Drehmoment, auch die Stärke des Magnetfeldes der Maschine getrennt auf gewünschte Werte eingestellt werden. Im Bereich niedriger Drehzahlen muß dazu bisher die Drehzahl oder die Winkellage der Maschinenwelle meßtechnisch erfaßt werden, was sich ungünstig auf Robustheit, Volumen und Kosten auswirkt. Es gibt deshalb viele Vorschläge, diesen Nachteil zu beseitigen.

Einige dieser Vorschläge werden in der Zeitschrift "IEEE Transactions on Industry Applications", Vol. 28, No. 6, 1992, Seiten 1367 bis 1375, behandelt. Keines der bekannten Verfahren genügt bisher allen Ansprüchen der Praxis. In der Zeitschrift "IEEE Transactions on Industry Applications", Vol. 29, 1993, Seiten 175 bis 180, wird beschrieben, wie durch den Vergleich der Ausgangsgrößen von zwei verschiedenen Rotorflußmodellen (Fig. 9) und Adaption des sogenannten "Strommodells" hinsichtlich des Parameters "Rotor-Winkelgeschwindigkeit" ein Schätzwert  $\hat{\omega}$  der entsprechenden Maschinengröße  $\omega_r$  gewonnen wird. Als Kriterium zur Verstellung von  $\hat{\omega}$  wird dabei nur die Winkelabweichung zwischen den von den beiden Modellen bestimmten Rotorflüssen benutzt, ein Betragfehler bleibt unberücksichtigt. Ein weiterer Nachteil liegt z. B. darin, daß die beiden Flußmodelle nicht ohne Meßgrößen der Maschinenspannungen und -ströme funktionieren. Bei Inbetriebnahme oder Störungssuche müssen diese Signale mit viel Aufwand künstlich erzeugt werden, falls der Leistungsteil nicht zugeschaltet werden kann oder nicht vorhanden ist.

Der Erfindung liegt nun die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung einer Drehzahl einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine anzugeben, wodurch kein Mehraufwand entsteht und wobei selbst bei kleinen Drehzahlen auf eine direkte Drehzahl- oder Lagemessung verzichtet werden kann.

Signalverarbeitungsverfahren, die nicht die oben erwähnten Nachteile einer Kombination zweier Flußmodelle aufweisen, enthalten unter anderem ein vollständiges Maschinenmodell, das z. B. allein aus den Vorgabewerten für das Drehmoment und für die Stärke des Drehfeldes sowie für die Rotor-Winkelgeschwindigkeit alle Zustandsgrößen des Systems in Echtzeit bestimmt, aus denen alle anderen interessierenden Größen algebraisch berechnet werden können.

Ein entsprechendes Verfahren zum Steuern und Regeln einer stromrichtergespeisten Induktionsmaschine ist z. B. beschrieben im VDI-Fortschrittbericht", Reihe 8, Nr. 479, "Schnelle Drehmomentregelung im gesamten Drehzahlbereich eines hoch ausgenutzten Drehfeldantriebs" bzw. im Aufsatz "Schnelle Drehmomentregelung im gesamten Drehzahlbereich eines hochausgenutzten Drehfeldantriebes", von D. Maischak und M. Németh Csóka, abgedruckt in der DE-Zeitschrift "Archiv für Elektrotechnik", Band 77 (1994), Seiten 289 bis 301.

Das erfindungsgemäße Verfahren der Drehzahlbestimmung ohne rotatorische Geber geht von der Tatsache aus, daß das Drehmoment einer Drehfeldmaschine im technisch ausnutzbaren Bereich zwischen generatorischem und motorischem Kippmoment bei unverändert er Speisespannung monoton vom Winkel  $\vartheta$  zwischen Statorfeld und Rotorfeld abhängt. Ausgehend vom Leerlauf ändert sich bei Asynchronmaschinen dieser Flußwinkel  $\vartheta$  monoton mit der Drehzahldifferenz und bei Synchronmaschinen die zeitliche Änderung  $\dot{\vartheta}$  dieses Winkels. Erhält die reale Maschine die gleiche Spannung wie ein Maschinenmodell mit gleichen Systemparametern, dann stimmen auch die Drehmomente überein, solange der Parameter Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  des Modells mit der wahren Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  der realen Maschine übereinstimmt. Ändert sich dann die Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  der realen Maschine gegenüber der geschätzten Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  dann stimmt deren Drehmoment  $M$  nicht mehr mit dem Drehmoment  $\hat{M}$  des Maschinenmodells überein. Durch einen Regler kann nun erfindungsgemäß der Parameter  $\hat{\omega}$  des Maschinenmodells so verstellt werden, daß die Drehmomente  $M$  und  $\hat{M}$  wieder übereinstimmen, d. h. "ausgeglichen" sind.

Statt die Drehmomente  $M$  und  $\hat{M}$  direkt zu vergleichen, ist es auch möglich, dem Drehmoment eindeutig zugeordnete Größen zu benutzen, wie z. B. die sogenannte drehmomentbildende Stromkomponente eines auf ein am Rotorfluß orientierten Bezugssystem rotatorisch transformierten Statorstromes.

Das heißt, ein ermittelter Statorstrom-Modellraumzeiger des Maschinenmodells und ein ermittelter Statorstrom-Istraumzeiger werden jeweils mittels eines Bezugraumzeigers in einen Real- und Imaginäranteil des komplexen Bezugssystems aufgespalten und die Imaginäranteile dieser beiden Stromraumzeiger werden miteinander verglichen. Stimmt die Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  mit der Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  der realen Maschine überein, so sind die ermittelten Imaginäranteile der beiden Stromraumzeiger gleich groß. Ist die Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  verschieden von der Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  der realen Maschine, so erhält man aus dem Vergleich eine von Null verschiedene Regelabweichung, die zur Verstellung der Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  verwendet wird. Dabei wird die Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  so lange verstellt, bis die erwähnte Regelabweichung zu Null geworden ist.

Bei einem vorteilhaften Verfahren werden außerdem die Realanteile des Statorstrom-Modellraumzeigers und des Statorstrom-Istraumzeigers miteinander verglichen, wobei eine ermittelte Regelabweichung zur Verstellung des Systemparameters Modell-Statorwiderstand  $R_S$  benutzt wird. Dadurch ist selbst eine korrekte Verstellung der Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  bei extrem niedrigen Ständerfrequenzen der Drehfeldmaschine mög-

lich. Denn bei diesen niedrigen Ständerfrequenzen sind bei vorgebbarer Statorspannung die Ströme der realen Maschine und die des Maschinenmodells praktisch nur vom Parameter Statorwiderstand  $R_S$  und Modell-Statorwiderstand  $\hat{R}_S$  abhängig.

Selbst wenn die Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  und die Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  der realen Maschine bei diesen niedrigen Ständerfrequenzen übereinstimmen, bleibt eine Regelabweichung am Eingang eines Ausgleichsreglers stehen. Das heißt, eine Änderung der Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  hat keine Auswirkung auf den Imaginäranteil des Statorstrom-Modellraumzeigers und damit auf das Drehmoment des Motormodells.

Bei einem weiteren vorteilhaften Verfahren wird die ermittelte Regelabweichung des Realteils mit dem Vorzeichen einer im Maschinenmodell berechneten Statorleistung multipliziert. Dadurch kann bei Änderung der Energieflußrichtung, d. h., wenn Bremsleistung an den Stromrichter zurückgespeist wird, auch der Regelsinn für die Verstellung des Systemparameters Statorwiderstand  $R_S$  umgekehrt werden.

Bei einer Vorrichtung zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens werden zur Signalverarbeitung, bestehend aus einem Maschinenmodell und einem Modulator, nur zwei Multiplizierer, ein Vergleicher und ein Ausgleichsregler hinzugefügt. Dadurch entsteht kein Mehraufwand.

Bei einer vorteilhaften Vorrichtung ist ein weiterer Vergleicher und ein weiterer Ausgleichsregler vorgesehen, mit dem der Parameter  $R_S$  verstellt werden kann.

Bei einer besonders vorteilhaften Vorrichtung sind die beiden Multiplizierer, die beiden Vergleicher und die beiden Ausgleichsregler im Prozessor des Maschinenmodells integriert, wodurch schaltungstechnisch keine Veränderung eintritt.

Zur weiteren Erläuterung der Erfahrung wird auf die Zeichnung Bezug genommen, in der ein Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens zur Bestimmung einer Drehzahl einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine schematisch veranschaulicht ist.

Fig. 1 zeigt eine Prinzipdarstellung einer Induktionsmaschine, die über einen Pulssstromrichter mit im wesentlichen konstanter Gleichspannung zwischen den Eingangsanschlüssen gespeist wird, die

Fig. 2 zeigt das Prinzip der Signalverarbeitung zur Bestimmung der Drehzahl der Induktionsmaschine allein unter Benutzung der gemessenen Statorspannungen und in der

Fig. 3 ist ein Blockschaltbild eines bekannten vollständigen Maschinenmodells dargestellt.

In der Fig. 1 wird ein Pulssstromrichter SR symbolisch durch die Umschalter  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  dargestellt. Die Umschalter  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  verbinden in Abhängigkeit von den zweiwertigen Steuersignalen  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  die Anschlüsse a, b, c mit dem positiven Anschluß "+" auf der Eingangsseite des Pulssstromrichters SR, wenn das zugehörige Schaltsignal den Wert Eins hat bzw. mit dem negativen Anschluß "-" , wenn der Wert des Schaltsignals gleich Null ist. Gemessen gegen das mittlere Potential M zwischen den Eingangsanschlüssen "+" und "-" kann ein zur Verbindung mit der Induktionsmaschine DM dienender Anschluß nur die Spannungswerte  $+E_d$  oder  $-E_d$  annehmen. Durch Pulsmodulation können in bekannter Weise die über ein Modulationsspiel mit der Dauer  $T_m$  gebildeten Mittelwertspannungen  $\bar{e}_{aM}$ ,  $\bar{e}_{bM}$ ,  $\bar{e}_{cM}$  jeden Wert zwischen  $+E_d$  und  $-E_d$  annehmen. Die Induktionsmaschine DM ist symbolisch durch ihr Raumzeiger-Ersatzschaltbild ( $\Gamma$ -Raumzeiger-Ersatzschaltbild) im ständerfesten Bezugssystem dargestellt.

Mit den üblichen Vereinfachungen genügen folgende Parameter zur vollständigen Systembeschreibung der Induktionsmaschine:

Der Statorwiderstand  $R_S$ , der Rotorwiderstand  $R_r$ , die Magnetisierungsinduktivität  $L_\mu$ , die Streuinduktivität  $L_\sigma$  sowie die elektrische Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Rotors, wobei  $\omega = \Omega \times p$  und mit  $\Omega$  die mechanische Winkelgeschwindigkeit des Rotors relativ zum Stator und mit  $p$  die Polpaarzahl der Maschine bezeichnet ist. Die Widerstandsparameter  $R_S$  und  $R_r$  ändern sich mit den zugehörigen Wicklungstemperaturen und die Induktivitäten  $L_\mu$  und  $L_\sigma$  mit den Flußverkettungen.

Aus den Größen in den Strängen a, b, c erhält man, dargestellt am Beispiel der Statorströme  $i_a$ ,  $i_b$  und  $i_c$ , die orthogonalen Koordinaten des komplexen Statorstrom-Raumzeigers  $\underline{i}_S$  nach folgenden Vorschriften:

$$i_{S\alpha} = -i_b - i_c,$$

$$i_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c) \quad (1)$$

$$\underline{i}_S = i_\alpha + j \cdot i_\beta$$

$$\text{mit } j = \sqrt{-1}$$

Um das pro Polpaar gebildete Drehmoment M zu berechnen, gibt es viele Möglichkeiten, z. B.

$$M = \text{Im} \cdot M = \frac{3}{2} (\Psi_{\mu}^* \cdot i_s) \quad (2)$$

5 mit  $\Psi_{\mu}^* = \Psi_{\mu\alpha} - j\Psi_{\mu\beta}$

10 Der Realteil der komplexen Größe  $M$ , der später behandelt wird, trägt zum wirklichen Drehmoment nichts bei und soll deshalb als Blindmoment  $BG$  bezeichnet werden.

Anstelle vom konjugiert komplexen Raumzeiger  $\Psi_{\mu}^*$  der Ständerflußverkettung kann in Gleichung (2) auch  
15 der aus den Rotorflußverkettungen abgeleitete konjugiert komplexe Raumzeiger  $\Psi_r^*$  eingesetzt werden, oder  
auch der Transformationsraumzeiger  $\Psi_r^* / |\Psi_r|$ , der konjugiert komplexe Wert des Einheitsraumzeigers in  
Richtung des Rotorflußraumzeigers  $\Psi_r$ .

20 Alle diese Produkte aus dem Statorstromraumzeiger  $i_s$  und einer komplexen "Transformationsgröße"  
 $T^*$  haben die Eigenschaft, daß ihr Imaginärteil dem wirklichen Drehmoment proportional ist, d. h. bei stationä-  
rem, symmetrischem Betrieb mit zeitlich harmonisch schwingenden Zustandsgrößen eine zeitlich konstante  
25 Gleichgröße bildet. Entsprechendes gilt für die "Blindgröße", dem Realteil der Produkte. Bezeichnet man  
allgemein den Raumzeiger der konjugiert komplexen Transformationsgröße als

$\hat{T}^* = \text{Bezugsgröße zur Aufspaltung des Statorstromes in}$

30  $i_{s\perp} = (\text{Drehmoment-})\text{Wirkkomponente des Statorstromes}$

und in

35  $i_{s\parallel} = (\text{Drehmoment-})\text{Blindkomponente des Statorstromes},$

so gilt

40  $\hat{T}^* \cdot i_s = \hat{T}^* \cdot i_{s\perp} + \hat{T}^* \cdot i_{s\parallel}$

45  $\text{Im}\left(\hat{T}^* \cdot i_s\right) = \text{Im}\left(\hat{T}^* \cdot i_{s\perp}\right) = \text{WG} \quad (\text{Momenten-Wirkgröße})$

50  $\text{Re}\left(\hat{T}^* \cdot i_s\right) = \text{Re}\left(\hat{T}^* \cdot i_{s\parallel}\right) = \text{BG} \quad (\text{Momenten-Blindgröße})$

55 Um festzustellen, ob die Drehmomente  $M$  und  $\hat{M}$ , und damit, bei sonst gleichen Systemparametern, auch die  
Drehzahlen  $\omega$  und  $\hat{\omega}$  von realer Maschine  $DM$  und Maschinenmodell übereinstimmen, braucht man nur die  
beiden Raumzeiger der Statorströme  $i_s$  und  $\hat{i}_s$  mit der gleichen Transformationsgröße  $\hat{T}^*$  zu multiplizie-  
ren und die Imaginärteile zu vergleichen:

60  $\text{Im}\left[\hat{T}^* \cdot \hat{i}_s\right] - \text{Im}\left[\hat{T}^* \cdot i_s\right] = \Delta L \quad (4)$

65 Wenn die Größe  $\Delta L$  durch Verstellung des Modellparameters  $\hat{\omega}$  zu Null gemacht wird, dann stimmen auf  
jeden Fall die zur komplexen Bezugsgröße  $\hat{T}^*$  orthogonalen Statorstromkomponenten  $\hat{i}_{s\perp}$  und  $i_{s\perp}$  überein.

für die Winkelgeschwindigkeiten  $\hat{\omega}$  und  $\omega$  gilt dies mit Sicherheit dann, wenn auch alle Systemparameter bei realer Maschine DM und beim Maschinenmodell gleich sind.

Die Fig. 2 zeigt beispielhaft, wie ein übliches Verfahren zum Steuern und Regeln einer Induktionsmaschine DM zu ergänzen ist, um auf eine direkte Messung der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  an der Maschine DM verzichten zu können. Dabei wird vorausgesetzt, daß ein vollständiges Maschinenmodell den Raumzeiger  $\hat{i}_s$  der Modell-

Statorströme beinhaltet und außerdem einen Bezugs-Raumzeiger  $\hat{i}_s^*$ , dessen Richtung jederzeit mit der des

Raumzeigers  $\hat{\Psi}_u$  der Ständerflußverkettung oder der von  $\hat{\Psi}_r$  der Rotorflußverkettung oder einer da zwischenliegenden Richtung übereinstimmt.

Die bekannte Signalverarbeitung 2, die unter anderem einen Modulator und ein vollständiges Maschinenmodell enthält, dessen Blockschaltbild in Fig. 3 näher dargestellt ist, realisiert normalerweise folgende Funktionen in ständig aufeinanderfolgenden Berechnungsspielen mit der konstanten Dauer  $T_c$ :

Aus dem Sollwert  $\hat{S}^F$  für die Stärke des magnetischen Drehfeldes und dem Sollwert  $\hat{M}^F$  für das Drehmoment wird der Raumzeiger  $\hat{e}_s$  der Ständerspannungen  $e_{aM}$ ,  $e_{bM}$  und  $e_{cM}$  berechnet, die notwendig sind, die Differenzen zwischen Soll- und Istwert zu reduzieren oder auf Null zu halten, wobei ein Schätzwert  $\hat{\omega}$  der Rotorwinkelgeschwindigkeit benötigt wird.

Ausgehend von der über das Meßglied 4 gemessenen aktuellen Eingangsgleichspannung  $2E_d$  des Stromrichters SR wird das zugehörige Pulsmuster für die Schaltvariablen  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  berechnet, wobei die inneren stromabhängigen Spannungsabfälle des Stromrichters SR berücksichtigt werden. Dazu muß vorher der Statorstrom-Raumzeiger  $\hat{i}_s$  des Maschinenmodells berechnet und dann zu Strangwerten  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  umgeformt werden.

Um den Statorstrom-Modellraumzeiger  $\hat{i}_s$  und alle anderen benötigten oder gewünschten Größen berechnen zu können, müssen zuvor nach den Reglern des Systems die Zustandsgrößen, z. B. Raumzeiger der Ständerflußverkettung  $\hat{\Psi}_u$  und Raumzeiger der Läuferflußverkettung  $\hat{\Psi}_r$  neu bestimmt werden. Am Ende des Berechnungsspiels mit der Dauer  $T_c$  liegt das Pulsmuster der Schaltvariablen  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  fest. Die zugehörigen Schalthandlungen werden innerhalb des nächsten Modulationsspiels der Gesamtdauer  $T_m = N \times T_c$ , wobei  $N$  eine ganze Zahl ist, an den zuvor berechneten Zeitpunkten von den Halbleiterschaltern des Stromrichters SR durchgeführt. Am Ende des betrachteten Berechnungsspiels ist nicht nur der zukünftige Wert des Statorstrom-Modellraumzeigers  $\hat{i}_s$  am Ende des gerade begonnenen Modulationsspiels bekannt, aus dem errechneten Pulsmuster kann auch der nächste Zwischenwert des Statorstrom-Modellraumzeigers  $\hat{i}_s$ , der am Ende des nächsten

Berechnungsspiels auftreten wird, bestimmt und abgespeichert werden. Die zugehörigen Ströme  $i_a$ ,  $i_b$  und  $i_c$  in der realen Maschine DM treten mit einer Verzögerung von  $T_c$  auf. Bis sie von dem Meßglied 6 erfaßt und am Koordinatenwandler 8 umgeformt zur Verfügung stehen, vergeht üblicherweise eine weitere Totzeit mit der Dauer  $T_c$  oder einem kleinen Vielfachen dieser Dauer. Diese Effekte werden in Fig. 2 durch die Totzeitglieder 10 und 12 symbolisch berücksichtigt. Unabhängig von der Zahl  $N$  der Berechnungszyklen, die in einem Modulationszyklus liegen, kann in jedem Berechnungszyklus der neue Wert des Statorstrom-Istraumzeigers  $\hat{i}_s$  der gemessenen Maschinenströme mit dem zugeordneten Statorstrom-Modellraumzeiger  $\hat{i}_s$  der Ströme des Maschinenmodells verglichen werden, der bereits einige Rechenzyklen zuvor berechnet und abgespeichert wurde, was in Fig. 2 durch das Totzeitglied 14 mit der Totzeit  $T_S$  symbolisiert wird, die sich aus der Summe der anderen Totzeiten ergibt.

Wird als Bezugsgröße zur Aufspaltung des Statorstrom-Raumzeiger  $\hat{i}_s$  und des Statorstrom-Modellraumzeigers  $\hat{i}_s$  ein ebenfalls um  $T_S$  zurückliegender (Totzeitglied 16) konjugiert komplexer Wert des als Bezugsgröße gewählten Raumzeigers  $\hat{i}$  benutzt, um in den Multipliziergliedern 18 und 20 gemäß Gleichung (3) die Größen

$$\hat{W}_G = \text{Im} \left( \hat{T}^* \cdot \hat{i}_s \right); \quad \hat{B}_G = \text{Re} \left( \hat{T}^* \cdot \hat{i}_s \right)$$

bzw.

$$WG = \text{Im} \left( \hat{T}^* \cdot \begin{matrix} \hat{i} \\ \rightarrow S \end{matrix} \right); BG = \text{Re} \left( \hat{T}^* \cdot \begin{matrix} \hat{i} \\ \rightarrow S \end{matrix} \right)$$

5

zu bilden, so stimmen die Wirkgrößen WG und  $\hat{WG}$  mit den Drehmomenten von realer Maschine DM und Maschinenmodell direkt überein bzw. bis auf einen gleichen Faktor überein.

10 Zur Adaption des Parameters Rotorgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  des Maschinenmodells wird ein Ausgleichsregler 22 vorgesehen, dessen Eingangsgröße, die Regelabweichung  $\Delta \perp$ , im Vergleicher 24 gebildet wird. Normalerweise sind die den Drehmomenten entsprechenden Größen WG und  $\hat{WG}$  selbst im stationären Betrieb zeitlich nicht konstant, weil die Eingangsspannungen für reale Maschine und für das Maschinenmodell pulsmoduliert verlaufen. Wenn aber beide Spannungen ebenso übereinstimmen wie alle Systemparameter, dann ist im ausgeglichenen Zustand die Regelabweichung  $\Delta \perp$  theoretisch gleich Null, praktisch mit guter Näherung. Das bedeutet, daß z. B. Verstärkung und Nachstellzeit des Ausgleichsreglers 22 so gewählt werden können, daß sich ein deutlich besseres dynamisches Verhalten als bei anderen Verfahren ergibt. In diesem Zusammenhang spielt die erfundungsgemäße Maßnahme, im Pfad der Signale  $\hat{i}_S$  und  $\hat{T}^*$  eine Totzeit wirken zu lassen, eine wesentliche Rolle.

20 Wie schon erwähnt, wird das Pulsmuster für die Schaltsignale  $S_a, S_b, S_c$  so berechnet, daß sich mit der aktuellen Eingangsgleichspannung  $2E_d$  und unter Berücksichtigung der inneren Spannungsabfälle des Stromrichters SR der gewünschte Mittelwert  $\bar{e}_S$  des Maschinenspannungs-Raumzeigers für das nächste Modulationsspiel ergibt.

25 Für den Fall, daß die Genauigkeit dieser Steuerung nicht ausreicht, um für die reale Maschine DM und das Maschinenmodell den vorausgesetzten gleichen Verlauf des Raumzeigers der Eingangsspannungen zu gewährleisten, können über ein Meßglied 26 die über ein Modulationsspiel gebildeten Mittelwerte der drei Ausgangsspannungen  $\bar{e}_{aM}, \bar{e}_{bM}$  und  $\bar{e}_{cM}$  des Stromrichters SR gemessen und als Istwerte für drei Spannungskorrektur-Regelungen verwendet werden, wobei allerdings wiederum eine Totzeit auftritt, die in Fig. 2 durch das Totzeitglied 28 berücksichtigt wird.

30 Um in anderer Hinsicht ein möglichst robustes Verfahren zu realisieren, ist es vorteilhaft, für die Bezugsgröße  $\hat{T}^*$  den korrigiert komplexen Raumzeiger der Ständerflußverkettungen  $\hat{\Psi}_\mu^*$  auszuwählen. Der Parameter  $L_\mu$  zeigt sehr starke Abhängigkeit von den Flußverkettungen, üblicherweise wird aber nur die Abhängigkeit der 35 Grundschwingungsinduktivität  $L_{\mu f}$  vom Betrag des Raumzeigers  $\Psi_\mu$  berücksichtigt, weil eine genaue Nachbildung der augenblicklichen Magnetisierungsströme  $i_{\mu a,b,c}$  abhängig von den Augenblickswerten der Flußverkettungen zu aufwendig ist. Da die Magnetisierungsströme  $i_{\mu a,b,c}$  aber keinen Beitrag zum Drehmoment liefern, 40 solange der Raumzeiger der Magnetisierungsströme  $\hat{i}_\mu$  richtungsgleich mit dem Raumzeiger  $\hat{\Psi}_r$  der Rotorflußverkettung bleibt, haben Unterschiede zwischen den Magnetisierungsstrom-Raumzeigern  $\hat{i}_\mu$  und  $\hat{\Psi}_\mu$  keinen Einfluß auf die Regelabweichung  $\Delta \perp$  und damit auch nicht auf den Zeitverlauf der Ausgangsgröße Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  des Ausgleichsreglers 22.

45 Durch die bisher geschilderten Maßnahmen wird sichergestellt, daß die Statorstromkomponenten  $\hat{i}_{S\perp}$  und  $\hat{i}_{S\perp}$  der realen Drehstrommaschine DM und des Maschinenmodells dynamisch gut und stationär nahezu ideal übereinstimmen, wenn das durch Adaption des Parameters Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  im Maschinenmodell möglich ist. Bei extrem niedrigen Ständerfrequenzen werden bei vorgegebener Spannung die Ströme der realen 50 Maschine DM und auch die des Maschinenmodells stationär praktisch nur durch die Parameter Statorwiderstand  $R_s$  und  $\hat{R}_s$  bestimmt. Der Statorwiderstand  $R_s$  ändert sich sehr stark mit der Wicklungstemperatur, so daß, wenn der Modellwert den Statorwiderständen  $R_s$  nicht nachgeführt wird, die Regelabweichung  $\Delta \perp$  am Eingang des Ausgleichsreglers 22 nicht gleich Null ist, selbst wenn die Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  und die Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  übereinstimmen. Das heißt, eine korrekte Bestimmung von der Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  ist dann nicht möglich.

55 Da durch Verstellen des Parameters Modell-Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\hat{\omega}$  nichts daran geändert wird, daß die Spannungen der realen Maschine DM und des Maschinenmodells so gut wie technisch möglich übereinstimmen, bleibt bei extrem kleinen Statorfrequenzen die Regelabweichung  $\Delta \perp$  so lange von Null verschieden, wie Unterschiede zwischen dem Statorwiderstand  $R_s$  und dem Modell-Statorwiderstand  $\hat{R}_s$  bestehen.

60 Erfundungsgemäß wird es durch den Vergleich des bisher nicht benutzten Blindmomentes  $\hat{BG}$  und  $BG$  möglich, diesen Mangel zu beseitigen. Stimmen die Parameter Statorwiderstand  $R_s$  und Modell-Statorwiderstand  $\hat{R}_s$  z. B. bei extrem niedrigen Frequenzen nicht überein, so führt das bei gleichen Spannungen nicht nur zu Unterschieden bei den drehmomentbildenden Stromkomponenten  $\hat{i}_{S\perp}$  und  $\hat{i}_{S\perp}$  der realen Maschine DM und 65 des Maschinenmodells, sondern ebenso zu Differenzen zwischen den flußbildenden Stromkomponenten  $\hat{i}_{S\parallel}$  und  $\hat{i}_{S\parallel}$  der realen Maschine DM und des Maschinenmodells und damit auch zur Ungleichheit der Blindmomente  $BG$  und  $\hat{BG}$ . Bildet man die Differenz  $\Delta||$  in einem weiteren Vergleicher 30, so kann über einen

weiteren Ausgleichsregler 32 der Parameter Modell-Statorwiderstand  $\hat{R}_S$  so lange verstellt werden, bis die Regelabweichung  $\Delta||$  den Wert Null annimmt. Bei Änderung der Energienflußrichtung, d. h. wenn Bremsleistung an den Stromrichter SR zurückgespeist wird, muß auch der Regelsinn des weiteren Ausgleichsreglers 32 umgekehrt werden. Dazu kann z. B. die Regelabweichung  $\Delta||$  mit dem Vorzeichen sign  $\hat{P}_S$  der Statorleistung  $\hat{P}_S$  multipliziert werden, wozu das Multiplizierglied 34 vorgesehen ist.

Bei mittleren und großen Ständerfrequenzen kann es zweckmäßig sein, die Verstärkungswirkung des Reglers 32 zu verringern.

Die Fig. 3 zeigt ein Blockschaltbild eines bekannten vollständigen Maschinenmodells. Das vollständige Maschinenmodell weist mehrere Multiplizierer 36, 38, 40, 42, 44 und 46, zwei Vergleicher 48 und 50, zwei Addierglieder 52 und 54 und zwei Integrierglieder 56 und 58 auf. Diesem vollständigen Maschinenmodell werden zwei Eingangsgrößen, nämlich ein Stromrichter-Ausgangsspannungs-Raumzeiger  $\hat{\epsilon}_S$  und ein Schätzwert  $\hat{\omega}$  der Rotorwinkelgeschwindigkeit und die Systemparameter Statorwiderstand  $R_S$ , Rotorwiderstand  $R_r$ , Magnetisierungsinduktivität  $L_\mu$  und Streuinduktivität  $L_\sigma$  zugeführt. Aus diesen Vorgabewerten berechnet das vollständige Maschinenmodell die Raumzeiger der Ständerflußverkettung  $\hat{\Psi}_\mu$ , der Rotorflußverkettung  $\hat{\Psi}_r$  und des Statorstromes  $\hat{i}_S$ . Der Statorstrom-Modellraumzeiger  $\hat{i}_S$  wird zur Berechnung von Schaltvariablen  $S_a$ ,  $S_b$  und  $S_c$  mittels eines nicht näher dargestellten Modulators der Signalverarbeitung 2 verwendet, wodurch die inneren stromabhängigen Spannungsabfälle des Stromrichters SR berücksichtigt werden können.

Als komplexe Bezugsgröße  $\hat{T}$ , die zur Aufspaltung des Statorstrom-Modellraumzeigers  $\hat{i}_S$  und des Statorstrom-Istraumzeigers  $\hat{i}_S$  benötigt wird, kann entweder der Raumzeiger der Ständerflußverkettung  $\hat{\Psi}_\mu$  oder der Raumzeiger der Rotorflußverkettung  $\hat{\Psi}_r$  oder der komplexe Wert des Einheitsraumzeigers  $\hat{\Psi}_r / |\hat{\Psi}_r|$  in Richtung des Rotorfluß-Raumzeigers  $\hat{\Psi}_r$  verwendet werden. Da gemäß dem erfundungsgemäßen Verfahren die konjugiert komplexe Bezugsgröße  $\hat{T}^*$  verwendet wird, müssen die Flußverkettungen  $\hat{\Psi}_\mu$  und  $\hat{\Psi}_r$  in konjugiert komplexe Flußverkettungen  $\hat{\Psi}_\mu^*$  und  $\hat{\Psi}_r^*$  gewandelt werden.

Wie diesem Blockschaltbild zu entnehmen ist, ist der Multiplizierer 36 eingangsseitig mit einem Eingang für den Parameter  $\hat{R}_S$  des Maschinenmodells und einem Ausgang des Addiergliedes 52 und ausgangsseitig mit einem Vergleicher 48 verbunden, an dessen nichtinvertierendem Eingang der Stromrichter-Ausgangsspannungs-Raumzeiger  $\hat{\epsilon}_S$  ansteht. Ausgangsseitig ist dieser Vergleicher 48 über ein erstes Integrierglied 56 mit dem Multiplizierer 38, einem nichtinvertierenden Eingang des Vergleichers 50 und einem Ausgang des Maschinenmodells verbunden. Ausgangsseitig ist der Multiplizierer 38 mit dem Addierglied 52 verbunden, dessen zweiter Eingang mittels des Multiplizierers 40 einerseits mit dem Ausgang des Vergleichers 50 und andererseits mittels eines weiteren Multiplizierers 42 mit einem Eingang eines weiteren Addiergliedes 54 verknüpft ist. Am zweiten Eingang der Multiplizierer 36, 38 und 40 steht jeweils ein Parameter, nämlich der Statorwiderstand,  $\hat{R}_S$ , der Reziprokwert der Magnetisierungsinduktivität  $1/L_\mu$  und der Reziprokwert der Streuinduktivität  $1/L_\sigma$ , an. Das Addierglied 54 ist ausgangsseitig mittels eines weiteren Integriergliedes 58 einerseits mit dem invertierenden Eingang des Vergleichers 50 und andererseits mit einem Ausgang des Maschinenmodells und mittels einer Reihenschaltung zweier Multiplizierer 46 und 44 mit dem zweiten Eingang des Addiergliedes 54 verknüpft. Am zweiten Eingang des Multiplizierers 46 steht der Faktor  $j$  und am zweiten Eingang des Multiplizierers 44 der Schätzwert  $\hat{\omega}$  der Rotorwinkelgeschwindigkeit an. Der Ausgang des Addiergliedes 52, an dem der Statorstrom-Modellraumzeiger  $\hat{i}_S$  ansteht, ist außerdem mit einem weiteren Ausgang des vollständigen Maschinenmodells verbunden.

Mit Hilfe dieses bekannten vollständigen Maschinenmodells kann man in Abhängigkeit eines ermittelten Spannungs-Raumzeigers  $\hat{\epsilon}_S$  des Stromrichters SR und einem Schätzwert  $\hat{\omega}$  der Rotorwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  die Flußverkettungen  $\hat{\Psi}_\mu$  und  $\hat{\Psi}_r$  der Drehfeldmaschine DM und den Statorstrom-Raumzeiger  $\hat{i}_S$  berechnen. Gegenüber der eingangs erwähnten Kombination zweier Flußmodelle wird die Meßgröße Statorstrom nicht benötigt, wodurch die Nachteile bei Inbetriebnahme oder Störungssuche bei einem vollständigen Maschinenmodell nicht auftreten.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung einer Drehzahl ( $\omega$ ) einer geberlosen, feldorientiert betriebenen Drehfeldmaschine (DM) wobei mittels einer Signalverarbeitung (2), die unter anderem ein vollständiges Maschinenmodell und einen Modulator enthält, in Abhängigkeit eines Fluß-Sollwertes ( $\hat{S}_F$ ) eines Drehmoment-Sollwertes ( $\hat{S}_M$ ) eines Gleichspannungswertes ( $E_d$ ), gemessener Stromrichter-Ausgangsspannungswerte ( $\hat{\epsilon}_{aM}$ ,  $\hat{\epsilon}_{bM}$ ,

ēcM) und Systemparameter ( $\bar{f}_\mu$ ,  $\bar{f}_\sigma$ ,  $\bar{R}_S$ ,  $\bar{R}_r/\bar{f}_\sigma \bar{\omega}$ ) einerseits Steuersignale ( $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$ ) und andererseits ein Statorstrom-Modellraumzeiger ( $\hat{i}_s$ ) und ein konjugiert komplexer Bezugstraumzeiger ( $\hat{T}^*$ ) berechnet werden, wobei ein ermittelter Statorstrom-Istraumzeiger ( $i_s$ ) und der berechnete Statorstrom-Modellraumzeiger ( $\hat{i}_s$ ) jeweils mit dem konjugiert komplexen Bezugstraumzeiger ( $\hat{T}^*$ ) multipliziert werden, wobei jeweils die Imaginäranteile ( $\hat{W}_G$ ,  $WG$ ) der berechneten Produkte miteinander verglichen werden und wobei eine daraus ermittelte Regelabweichung ( $\Delta \perp$ ) derart zur Verstellung des Systemparameters Rotorwinkelgeschwindigkeit ( $\bar{\omega}$ ) verwendet wird, daß die ermittelte Regelabweichung ( $\Delta \perp$ ) zu Null wird.  
 5. Verfahren nach Anspruch 1, wobei jeweils die Realanteile ( $\hat{B}_G$ ,  $BG$ ) der berechneten Produkte miteinander verglichen werden und wobei eine daraus ermittelte Regelabweichung ( $\Delta ||$ ) derart zur Verstellung des Systemparameters Statorwiderstand ( $\bar{R}_S$ ) verwendet wird, daß die ermittelte Regelabweichung ( $\Delta ||$ ) zu Null wird.  
 10. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Statorstrom-Modellraumzeiger ( $\hat{i}_s$ ) und der konjugiert komplexe Bezugstraumzeiger ( $\hat{T}^*$ ) in Abhängigkeit einer vorbestimmten Zeit ( $T_\Sigma$ ) verzögert werden.  
 15. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die ermittelte Regelabweichung ( $\Delta ||$ ) des Realanteils ( $\hat{B}_G$ ,  $BG$ ) mit dem Vorzeichen (sign  $\hat{P}_S$ ) einer im Maschinenmodell berechneten Statorleistung ( $\hat{P}_S$ ) multipliziert wird.  
 20. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 mit einer Signalverarbeitung (2), die unter anderem ein vollständiges Maschinenmodell und einen Modulator enthält, wobei ein Ausgang des Maschinenmodells, an dem der konjugiert komplexe Bezugstraumzeiger ( $\hat{T}^*$ ) ansteht, mit einem Eingang eines ersten und zweiten Multiplizierers (18, 20) und ein Ausgang des Maschinenmodells, an dem der Statorstrom-Modellraumzeiger ( $\hat{i}_s$ ) ansteht, mit einem zweiten Eingang des ersten Multiplizierers (18) verbunden ist, wobei der zweite Eingang des zweiten Multiplizierers (20) mittels eines Koordinatenwandlers (8) mit einem Ausgang eines Strom-Meßgliedes (6) verbunden ist, wobei die Ausgänge der Multiplizierer (18, 20), an denen die Imaginäranteile ( $\hat{W}_G$ ,  $WG$ ) der berechneten Produkte anstehen, mit einem Vergleicher (24) verknüpft sind, der ausgangsseitig über einen Ausgleichsregler (22) mit einem Parametereingang des Maschinenmodells verknüpft ist.  
 25. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei die Ausgänge der beiden Multiplizierer (18, 20), an denen die Realanteile ( $\hat{B}_G$ ,  $BG$ ) der berechneten Produkte anstehen, mit einem weiteren Vergleicher (30) verknüpft sind, der ausgangsseitig über einen weiteren Ausgleichsregler (32) mit einem weiteren Parametereingang des Maschinenmodells verknüpft ist.  
 30. Vorrichtung nach Anspruch 6, wobei zwischen dem Ausgang des weiteren Vergleichers (30) und dem weiteren Ausgleichsregler (32) ein Multiplizierer (34) angeordnet ist, dessen zweiter Eingang mit einem Ausgang des Maschinenmodells verknüpft ist, an dem ein Vorzeichensignal (sign  $\hat{P}_S$ ) ansteht.  
 35. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei diese Vorrichtung im Prozessor des Maschinenmodells integriert ist.  
 40. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei diese Vorrichtung im Prozessor des Maschinenmodells integriert ist.  
 45. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei diese Vorrichtung im Prozessor des Maschinenmodells integriert ist.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65

**- Leerseite -**

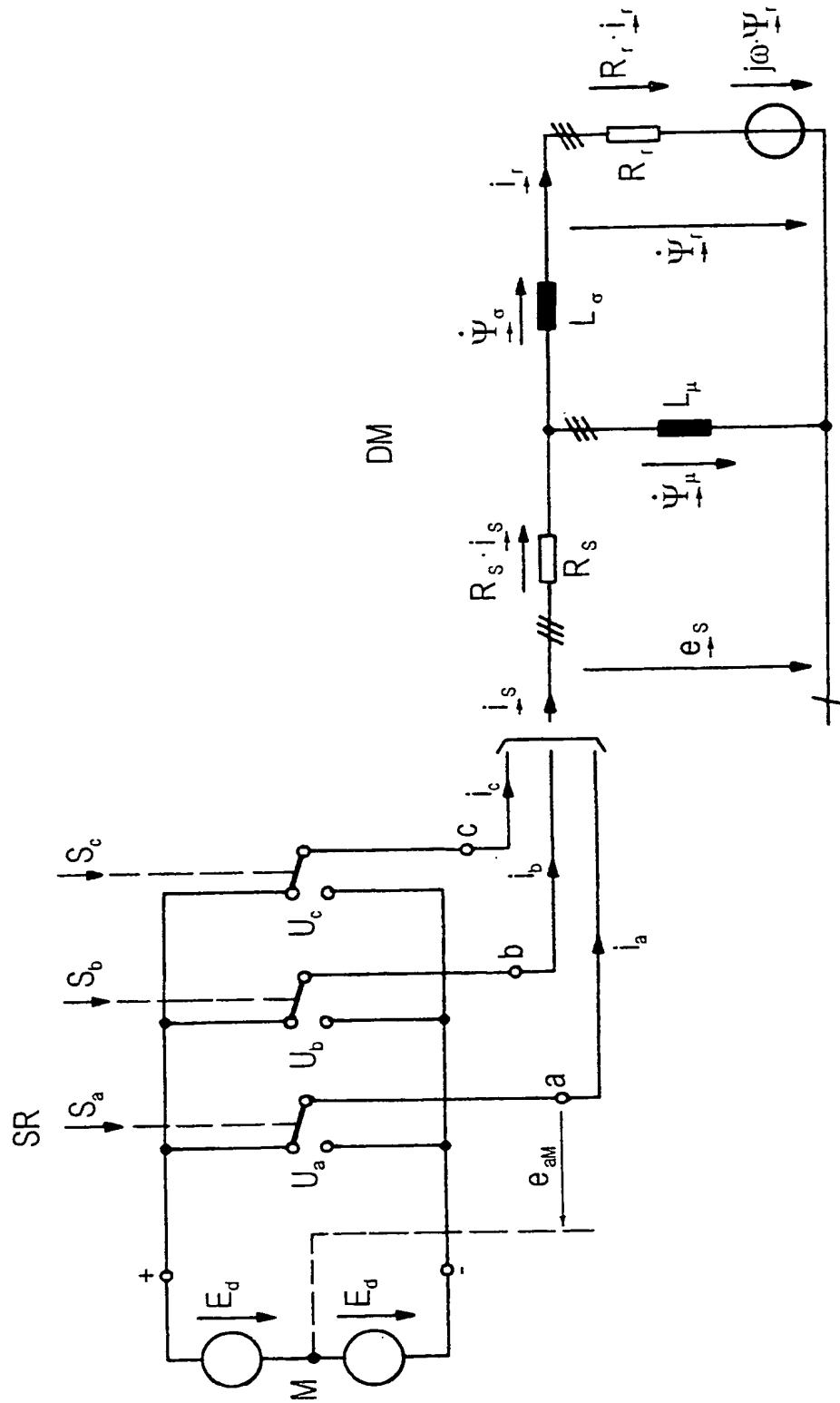
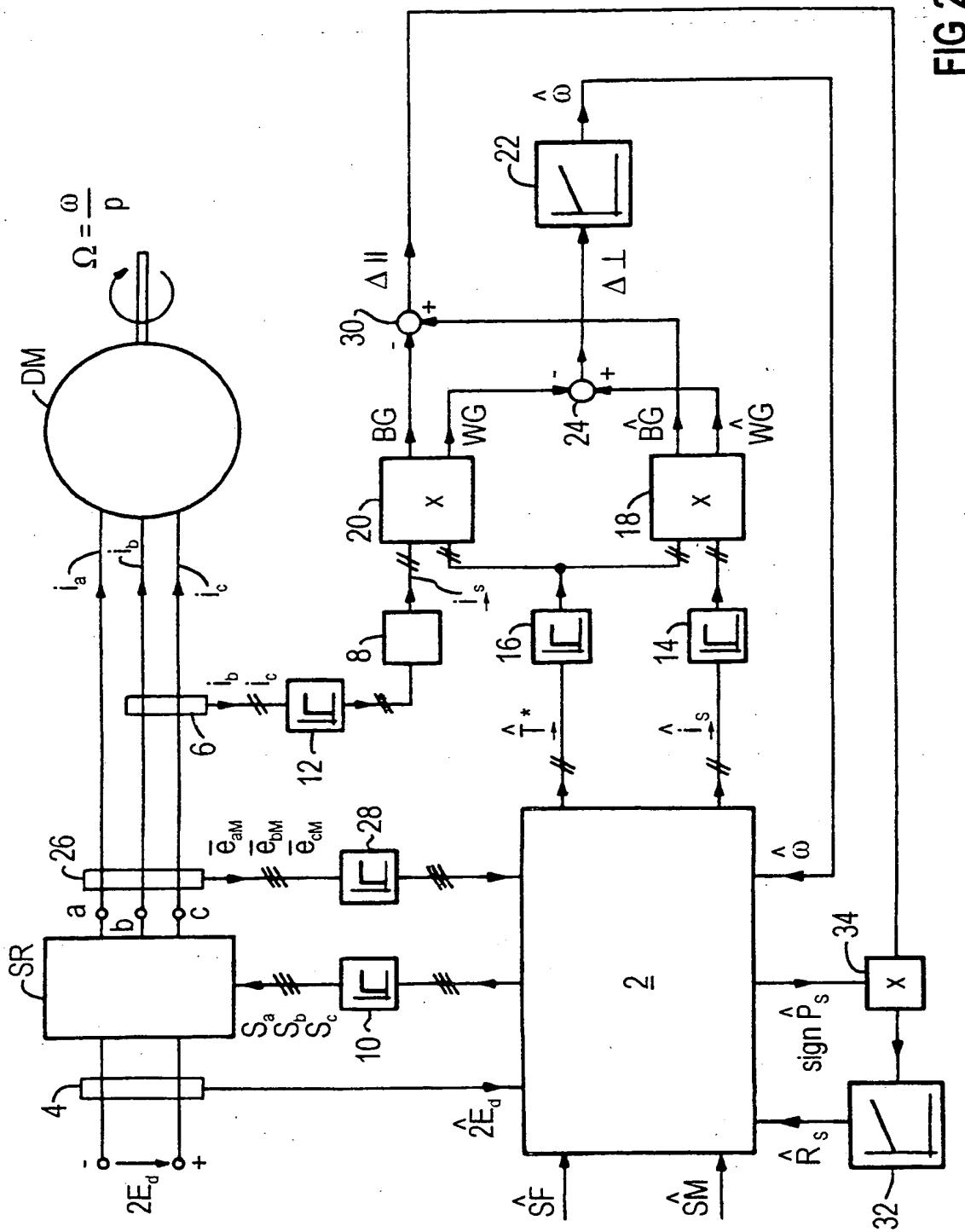


FIG 1



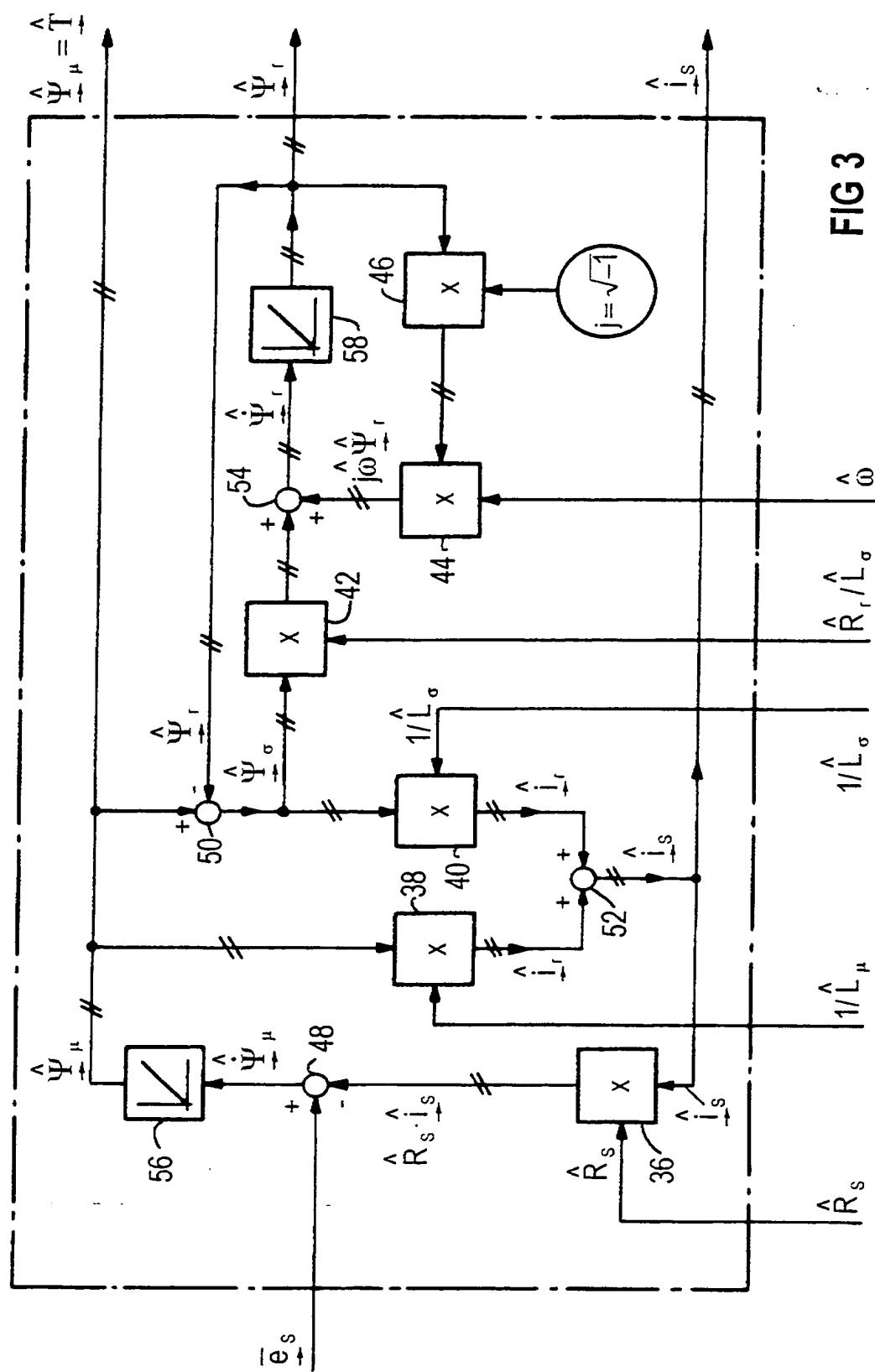


FIG 3